

生物填料在重污染河道治理中的应用研究*

周 勇 操家顺 杨婷婷

(河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 将生物填料应用于城市重污染河道治理, 研究了随时间的推移, 填料垂直方向上生物膜的膜量、膜组成、膜活性变化规律以及生物填料对水质的改善效果。试验结果表明, 该生物填料生物膜活性以比基质耗氧速率表示为 0. 153~ 0. 174 mg/(g·h)。在挂膜进行到第 40 天、悬挂密度为 24 根/m²时, 对水质改善达到最佳效果, 对 TN、TP、COD、Chla、浊度的去除率分别为 53%、35%、50%、5%、44%。

关键词 生物填料 河道治理 挂膜

Porous stuffing material for biofilm treatment of highly polluted urban river way Zhou Yong, Cao Jiashun, Yang Tingting. (College of Environmental Science and Engineering, Hohai University, Nanjing Jiangsu 210098)

Abstract: Spherical elastic porous stuffing material (ZH901, 140 mm in diameter, 300 m²/m³) was employed for biofilm treatment of a highly polluted urban river way in Suzhou, Jiangsu. The experimental program involved 6 test areas (4 m×2 m×1 m); five areas were packed with 3~ 48 stuffing units/m². Biomass and composition and activity of the biofilm samples taken from 3 vertical positions (top, middle and bottom) of the packed section were monitored for 50 days. SOUR was 0. 153~ 0. 174 mg O₂/(g·h). The best treatment performance was obtained in the test area packed with 24 stuffing units/m² after 40 days; the removal rates for TN, TP, COD, Chla and turbidity were 53%, 35%, 50%, 5% and 44%, respectively. Algal growth was not affected by the biofilm treatment.

Keywords: Bio-stuffing River way improvement Biofilm treatment

国外对河流强化净化技术的研究与应用始于 20 世纪 50 年代的日本、美国及欧洲一些发达国家。日本研究开发的河流强化净化技术大多是对河流的间接净化, 即将净化设施建在河流的一侧, 利用河道落差将水引到净化设施内净化后再放流, 且净化设施多采用地下式, 以节约用地^[1-4]。欧美等国家则多倾向于河道的直接曝气、河道清淤、恢复河流两岸湿地和恢复蛇形河道等的自然净化方式^[5-9]。

我国对河流强化净化技术的研究还处于起步阶段, 实际应用的技术只有引水稀释、清淤等机械物理的方法, 河道曝气也只是在北京、重庆和上海等地的小河道治理中使用过, 而利用生物(包括水生植物和微生物等) 对污染河流进行强化净化的研究还只处于试验阶段^[10-13]。

城市重污染河道普遍存在低透明度、低溶解氧和高有机悬浮物等问题, 使得高等水生动植物恢复技术的应用受到了严重限制。而生物填料具有不受透明度、光照等限制的特点。布置合理的填料在保持河道通航和排洪等原有功能以及不影响城市景观的基础上, 显著降低水体浊度, 并且削减水体 COD、N 和 P 等

污染负荷, 提高水体 DO 含量, 从而为后续的高等水生动植物的生态修复创造有利的前提条件。

1 试验材料与方法

1.1 试验水样

本试验开展于苏州市南园河。试验初始水质: pH 为 7. 0~ 7. 8、TN 为 7. 64 mg/L、TP 为 0. 82 mg/L、COD 为 52. 11 mg/L、Chla 为 19. 36 μg/L、浊度为 11. 45 NTU。实验期间水温在 11~ 17℃。

1.2 试验材料

用透水率≤0. 1% 的防水布及 Φ100 mm 的 UPVC 管在苏州市南园河示范区现场设置 6 个规格为 4 m×2 m×1 m 的围隔试验区。其中 5 个围隔试验区内投放不同密度的填料, 另外 1 个作为空白对照组。

试验填料选用 ZH901 弹性立体填料, 具体参数见表 1。

表 1 ZH901 弹性立体填料参数
Table 1 Property of ZH901 porous elastic stuffing material

填料直径 /mm	丝径 /mm	质量 /(kg·m ⁻³)	比表面积 /(m ² ·m ⁻³)	空隙率 /%
140	0. 5	2. 64~ 3. 06	265~ 307	> 99

第一作者: 周 勇, 男, 1981 年生, 硕士研究生, 主要从事水生态修复技术研究。

* 国家“十五”重大科技专项“863”资助项目(No. 2003AA601070)。

围隔试验区内布置木质框架, 填料顶部悬挂于框架上, 填料底部拴铁质螺母使其均匀垂直悬挂。各密度梯度设置见表 2。

表 2 围隔试验区内密度梯度 (根 · m⁻²)
 Table 2 Packing density of the 5 experimental areas

试验项目	梯度设置				
	挂膜 1#	挂膜 2#	挂膜 3#	挂膜 4#	挂膜 5#
生物填料	3	6	12	24	48

1.3 试验测定项目及方法

每隔 10 d 测定围隔试验区内水体的 TN、TP、COD、Chla 和浊度等指标, 具体测定方法见表 3。每次采样测定表、中、底层单位质量填料附着生物膜的质量并镜检其生物组成。

表 3 水质检测指标及方法
 Table 3 Analytical methods employed for measurement of water quality parameters

检测指标	测定方法
TN	过硫酸钾氧化-紫外分光光度法
TP	钼锑抗分光光度法
COD	重铬酸钾标准法
Chla	丙酮萃取分光光度法
浊度	德国夸克浊度仪直接读数法

测定比基质耗氧速率 (SOUR): 取 BOD 瓶, 加入 500 mL 该河道水, 对水样曝气, 使其达到饱和 DO, 再加入 10 g 经离心后的生物膜, 密封 BOD 瓶。置于 25 ℃ 恒温, 并持续磁力搅拌, 每隔 30 min 记录 DO 变化, 计算该生物膜的 SOUR, 见式(1)。

$$SOUR = \left[\frac{(DO_0 - DO_{t1})v}{mt} + \frac{(DO_{t1} - DO_{t2})v}{mt} + \dots + \frac{(DO_{ti-1} - DO_{ti})v}{mt} \right] / i \quad (1)$$

式中: SOUR 为比基质耗氧速率, mg/(g · h); DO₀、DO_{t1} DO_{ti} 分别为水样初始、.....ti 时的 DO, mg/L; v 为水样体积, L; m 为生物膜膜量, g; t 为测定时间间隔, h; i 为测定次数。

用各围隔试验区的水质指标与空白对照组的水质指标的差值来表示去除率, 见式(2)。

$$\eta = \frac{(C_0 - C_i) - (C_0 - C_{cki})}{C_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中: η 为水质指标的去除率, %; C₀ 为围隔试验区初始浓度; C_i 为围隔试验区第 i 天的浓度; C_{cki} 为空白对照组第 i 天的浓度。各变量单位按检测指标而定。

2 结果与分析

2.1 填料垂直方向生物膜活性比较

无论是生物膜膜量还是生物膜厚度, 都只能反映附着、生长微生物的数量, 不反映其活性。生物膜

的活性是决定系统处理效率的关键因素, 而 SOUR 直接反映了微生物代谢速率。因此, 本试验用 SOUR 描述生物膜的活性。

填料垂直方向生物膜耗氧情况见图 1。根据式(1) 计算, 表、中、底层生物膜的 SOUR 分别为 0. 169、0. 174、0. 153 mg/(g · h)。

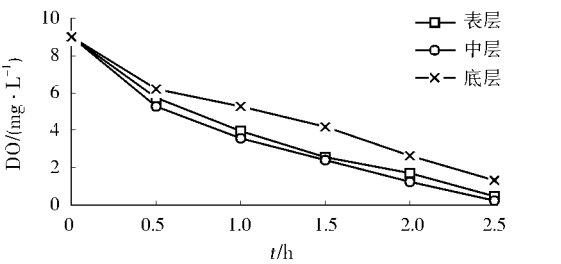


图 1 填料垂直方向生物膜耗氧变化
 Fig. 1 Oxygen decay curves for biofilm of top, middle and bottom of the packed section

中层的生物膜 SOUR 最高, 表层其次, 底层最差, 在垂直方向总体差异不大。表层填料的生物膜以藻类为主, 白天藻类的光合作用可以补偿少部分由微生物代谢所消耗的氧气; 中层填料的生物膜以藻类及微型动物为主, 其生命活动均需消耗氧气, 所以该层 SOUR 最高; 而底层填料的生物膜则主要为无机悬浮物及少量藻类, 所以该层 SOUR 相对表层及中层低 9%、12% 左右。由于河道的深度小于 2 m, 在自然状况下河道水体上下混合较为均匀, 所以总体上填料垂直方向的生物膜活性变化不大。

2.2 填料垂直方向生物膜膜量及生物膜组成比较

由表 4 可知, 悬挂于苏州市南园河的弹性立体填料在垂直方向单位质量挂膜膜量为表层> 底层> 中层, 且在实验进行到 40 d 时(根据以往的试验数据进一步确定) 达到最大值。填料表面附着物在显微镜下观察发现, 表、中层填料附着物中所含藻类、微型动物数量及种类较多, 而底层则以厌氧污泥状无机悬浮物为主, 具体组成见表 5。

表 4 不同时间每克填料垂直方向的生物膜膜量 (g)
 Table 4 Biomass density (g/g staffing material) of 3 biofilm samples over time

日期	11 月 18 日 ¹⁾	11 月 28 日	12 月 8 日	12 月 18 日	12 月 28 日
表层 20 cm	2. 01	2. 39	2. 71	2. 67	2. 55
中层 50 cm	1. 91	2. 03	2. 28	2. 22	2. 28
底层 80 cm	1. 98	2. 25	2. 28	2. 48	2. 39

注: ¹⁾ 由于弹性立体填料开始放入苏州市南园河内时并无生物膜附着, 所以试验开始时无需对填料生物膜膜量进行测定, 11 月 18 日为第 1 个 10 d 试验周期, 对生物膜膜量进行第 1 次测定。

由表 5 可见, 填料上所附着的藻类均为异养型藻类, 填料表面粘附的悬浮有机物为藻类的生长提

表 5 填料生物膜中藻类及微型动物分布
Table 5 Distribution of algae and small animals in 3 biofilm samples

种属	表层	中层	底层	种属	表层	中层	底层
颤藻	+++	+++	+	羽纹藻	+++	++	++
平板藻	++	++	+	直链藻	+++	++	+
裸藻	++	-	-	扁卷螺	++	++	-
辐节藻	+	+	+	急游虫	-	++	-
舟形藻	++	+	-	游仆虫	-	+	-
小环藻	+++	++	+	长足轮虫	++	-	+

注:+++ 表示数量很多;++ 表示数量较多;+ 表示数量较少;- 表示无。

供了部分营养物质, 填料载体为藻类的附着生长提供了较为固定的基质, 所以在城市河道利用生物膜技术进行处理时, 填料表面富集的大量异养型藻类和微型动物是区别于污水处理中生物膜的一个重要特点。从表 5 还可以看出, 随着深度的增加, 藻类的种类和数量逐渐减少, 主要因为城市河道水体透明度普遍较低, 一般在 40~ 60 cm, 由于光照限制, 致使藻类集中分布在光线较为充足的表层水体, 且水体 DO 含量在垂直方向由上至下递减。试验过程中观察到中层填料微型动物的数量最多, 原因为中层的水力扰动较表层低, 受水力冲刷较小, 微型动物更容易附着于填料上。

2.3 填料围隔试验区内水质变化情况

选择围隔试验区内挂膜 40 d 的水质, 分析 TN、TP、COD、Chla 和浊度的变化, 详见图 2 至图 6。

由图 2 至图 6 可知: 对 TN 的去除率为 4# > 5# > 3# > 2# > 1# ; 对 TP 的去除率为 3# > 4# >

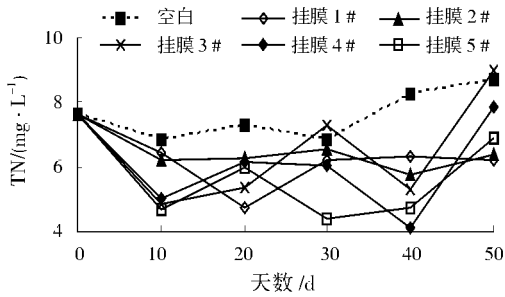


图 2 填料围隔试验区内 TN 变化
Fig. 2 TN profiles for the test areas

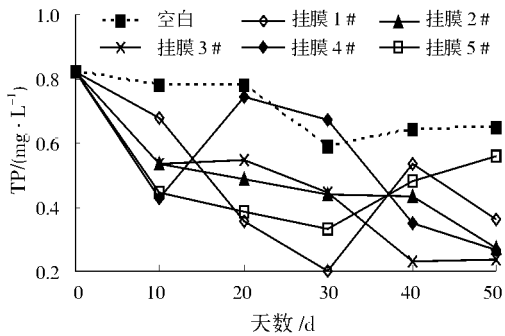


图 3 填料围隔试验区内 TP 变化
Fig. 3 TP profiles for the test areas

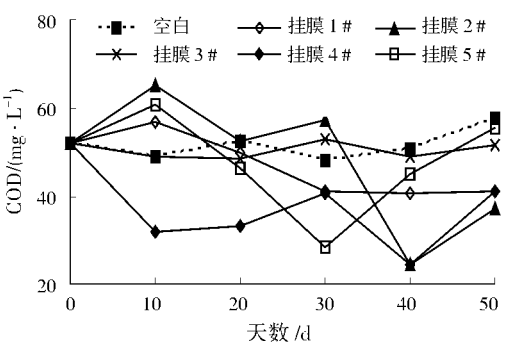


图 4 填料围隔试验区内 COD 变化
Fig. 4 COD profiles for the test areas

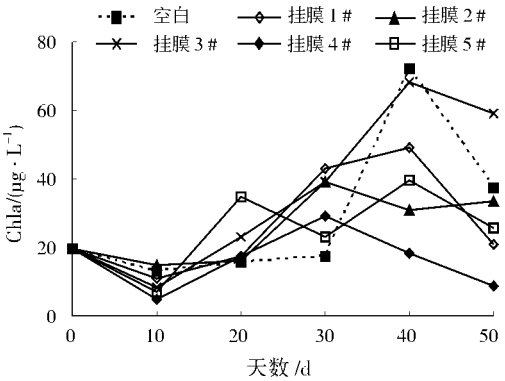


图 5 填料围隔试验区内 Chla 变化
Fig. 5 Chla profiles for the test areas

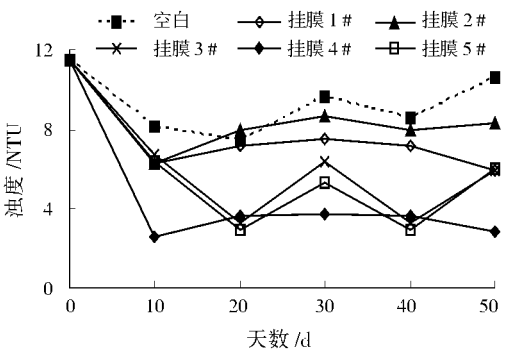


图 6 填料围隔试验区内浊度变化
Fig. 6 Turbidity profiles for the test areas

2# > 5# > 1# ; 对 COD 的去除率为 2# > 4# > 1# > 5# > 3# ; 对 Chla 无明显去除效果; 对浊度的改善效果为 5# > 3# > 4# > 1# > 2# 。

从图 2 至图 6 可以看出, 在城市河道现场水体

开展实验,由于受到天气等不可控制因素的影响,实验结果呈现波动及无规律性。但对比各项水质指标可以看出,4# 围隔试验区内的水质指标总体好于其他各围隔试验区。表明该生物填料最佳悬挂密度为 24 根/ m^2 。

该生物填料在挂膜进行到第 40 天、悬挂密度为 24 根/ m^2 的情况下对 TN、TP、COD、Chla、浊度的去除率分别达到 53%、35%、50%、5%、44%。由于填料悬挂于现场水体封闭的围隔试验区内,具有很好的光照条件,且水体的扰动很小,所以在实验中观察到填料表面附着高密度的藻类。藻类的生长会消耗一定的营养盐,加之现场围隔透水率极低,基本不存在水体交换,外围水体的营养盐无法进入围隔试验区,所以监测发现围隔试验区内的生物填料对 TN、TP 都有较高的去除率。除此之外,附着于填料表面藻类的分泌物可以粘附水体悬浮物,生物膜具有较高的食物链结构,老化的膜比较致密,能较好地沉降围隔试验区底部,所以对浊度也具有较好的去除率。

在城市重污染河道治理中,浮床植物净化技术已被广泛应用。生物膜技术与浮床植物净化技术结合,浮床不仅为填料提供了悬挂载体,而且浮床植物根系输送来的氧气为生物膜中好氧异养菌及微型动物创造良好的环境条件。生物填料相当于浮床植物根系的延伸,可以持续改善河道 0.5 m 以下水体水质。国家“十五”重大科技专项——苏州城市水环境质量改善及综合示范,在苗家河工程示范段中布置了 4 道 1.5 m \times 90 m 的水芹菜浮床,生物填料按 24 根/ m^2 的悬挂密度布设于浮床载体之下,在挂膜成熟后,结合浮床植物对水质改善的作用,对 COD、TN、TP 的平均去除负荷分别达到 1.06、0.37、0.08 kg/($\text{m}^2 \cdot \text{a}$),显著高于文献报道的单纯浮床植物净化技术对 COD、TN 和 TP 的去除效果,并且对河道水体浊度平均去除率达到 60% 以上。在城市重污染河道中,高含量的悬浮物不仅会显著降低水体透明度,其次悬浮物在沉水植物表面的附着,严重影响沉水植物的光合作用及呼吸作用,抑制沉水植物正常的生长、繁殖。所以降低河道水体浊度对河道水生态的恢复具有极其深远的意义。

3 结论与建议

(1) 弹性立体填料适宜应用于城市重污染河道水体的修复。

(2) 悬挂于苏州市南园河的弹性立体填料在垂直方向单位质量挂膜量为表层> 底层> 中层,垂

直方向生物膜组成表层主要为藻类,中层主要为藻类及微型动物,底层主要为无机底泥及少量藻类。

(3) 弹性立体填料表、中、底层生物膜 SOUR 分别为 0.169、0.174、0.153 mg/($\text{g} \cdot \text{h}$)。

(4) 该生物填料在挂膜进行到第 40 天、悬挂密度为 24 根/ m^2 的情况下对水质净化的效果最好,对 TN、TP、COD、Chla、浊度的去除率分别达到 53%、35%、50%、5%、44%。

(5) 该生物填料可显著降低重污染河道内的有机污染负荷及 N、P 营养盐,提高水体透明度,但对水体藻类无明显抑制作用。

(6) 若结合底层曝气,可以加快生物填料的挂膜速度,并增加生物膜上微生物的种类及数量,提高生物膜食物链结构,降低生物膜的产泥量,使其具有更好的沉降性能,同时能提高对水体有机负荷以及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率,而且填料对气泡的重复切割作用可以提高曝气利用的效率。所以在城市重污染河道的治理中,建议采用底层曝气与填料挂膜相结合的方法。

参考文献

- [1] 長内武逸. 砾间接触酸化法による河川水の直接浄化[J]. 用水と廃水, 1990, 32(8): 16-25.
- [2] 平根健. 発泡プラスチック担持体での生物膜濾過の効用例について[J]. 環境技術, 1989, 18(2): 22-24.
- [3] 本橋敬之助, 山内隆, 南彰則. 不织布接触ろ材を用いた排水路の水質浄化[J]. 水処理技術, 1996, 37(3): 33-39.
- [4] 芳倉太郎, 西尾孝之, 北野雅昭. 生物活性炭付着細菌による河川水中の有機物分解[J]. 用水と廃水, 1997, 9(2): 9-26.
- [5] KONDRATYEV S. A system for ecological and economic assessment of the use, preservation and restoration of urban water bodies; St Petersburg as a case study[J]. IAHS-AISH Publication, 2003, 281: 327-333.
- [6] WHALEN P J, TOTL L A, KOEBEL J W, et al. Kissimmee river restoration: a case study[J]. Water Science and Technology, 2002, 45(11): 55-62.
- [7] MAGDALENO A, PUIG A, CABO L, et al. Water pollution in an urban Argentine River[J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2001, 67: 408-415.
- [8] DAVIS N M, WEAVER V, PARKS K, et al. An assessment of water quality, physical habitat, and biological integrity of an urban stream in Wichita, Kansas, prior to restoration improvements (Phase I)[J]. Environmental Contamination and Toxicology, 2003, 44: 351-359.
- [9] TUCKER L. Scott, urban river renewed-Denver's South Platte River[R]. USA ASCE: American Society of Civil Engineers-Task Committee, 1999.
- [10] 王学江, 夏四清, 张全兴, 等. 悬浮填料移动床处理苏州河支流河水试验研究[J]. 环境污染治理技术与设备, 2002, 3(1): 27-30.
- [11] 李家就, 杨文进, 朱建国, 等. 受污染珠江水的生物膜法预处理研究[J]. 中国给水排水, 1999, 15(7): 8-10.
- [12] 唐玉斌, 刘宏伟, 陆柱, 等. 装有填料的河水修复反应器中氧的传递特性[J]. 华东理工大学学报, 2002, 28(6): 625-628.
- [13] 田伟君, 翟金波, 王超. 城市缓流水体的生物强化净化技术[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003(9): 58-62.

责任编辑: 贺锋萍 (修改稿收到日期: 2006-12-08)